

希格斯玻色子最主要衰变过程的发现

梁志均[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2018-09-18收到

[†] email: liangzj@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20181106

2018年7月9日, 欧洲核子研究中心(CERN)大型强子对撞机(LHC)上的ATLAS实验在韩国首尔举行的国际高能物理会议上宣布, 独立发现了希格斯粒子^[1-4]的最主要的衰变过程——正反底夸克对衰变($H \rightarrow b\bar{b}$)^[5-11]。同年8月5日, CERN的CMS实验组也确认这个发现^[12-17]。8月28日, CERN通过发布会正式宣布这个激动人心的结果, 物理学家都欢呼沸腾, 各国的媒体都有追踪报道。

“上帝粒子”与基本粒子质量来源之谜

希格斯玻色子究竟是何方神圣? 为什么希格斯玻色子如此重要? 希格斯玻色子也被誉为“上帝粒子”, 它之所以如此受重视, 是因为它是基本粒子质量的来源。

基本粒子为物理世界的基本单元。如果把物质分割得越来越小, 你会得到构成物质的分子或者原子; 但这些东西还能进一步分解成电子和原子核; 而原子核又可以继续被分割成质子和中子, 而它们的内部则是夸克。夸克与电子是目前我们所知道构成世界的基本粒子, 理解它们的质量来源对科学家探索物理世界的意义非常重大。希格斯场在宇宙的形成中也扮演着重要的角色。在宇宙大爆炸之初, 各种基本粒子(包括电子)都是以光速运动, 并没有形成物质结构。在希格斯场作用下, 基本粒子(如电子、夸克)获得质量, 最终形成原子、分子等构成物质世界的单元。经过漫长岁月

形成星系等大型物质结构, 最后促使生命的出现。综上所述, 希格斯粒子与基本粒子的相互作用是我们研究微观物质世界与宇宙的关键之一。不同基本粒子的质量各不相同。从没有质量的光子到质量最重的顶夸克, 跨越超过十个数量级以上。这些质量来自何方呢?

在20世纪60年代, 理论学家预言真空中遍布着希格斯场, 基本粒子通过与真空中希格斯场相互作用而产生质量^[1-4]。该理论成功解释了为什么传递电磁相互作用的光子没有质量, 而传递弱相互作用的W、Z玻色子则是非常重。

为了寻找希格斯场, CERN在20世纪末建造了大型强子对撞机, 以重现宇宙形成之初的超高能量的极端条件。2012年, CERN的ATLAS与CMS实验在玻色子衰变道发现了希格斯玻色子^[18, 19]。2013年的诺贝尔物理学奖授予理论物理学家彼

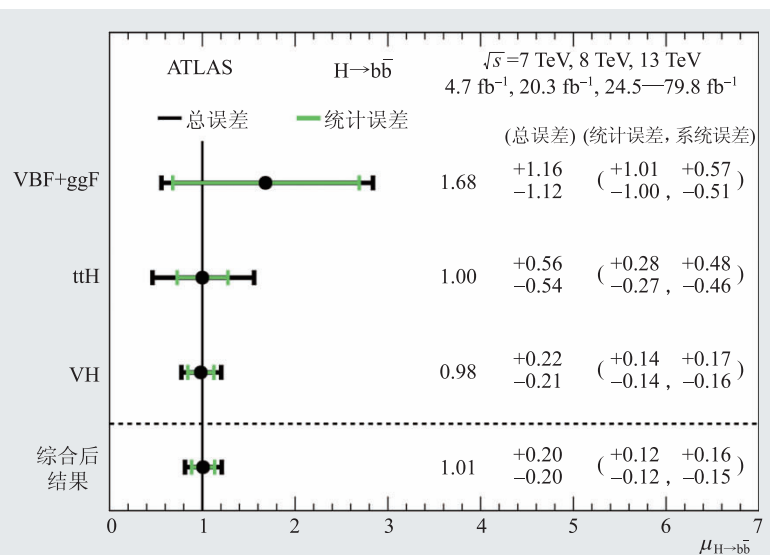


图1 ATLAS实验综合了VBF+ggF、ttH、VH(W/Z玻色子对伴随产生过程)产生过程的独立分析, 结果最终发现 $H \rightarrow b\bar{b}$ 衰变道。上图为这些产生过程观测的信号强度相对于预期信号强度的比值。其中高能所团队主导了ggF+VBF过程 $H \rightarrow b\bar{b}$ 分析^[5]

得·W·希格斯(Peter W. Higgs)和弗朗索瓦·恩格勒(Francois Englert),以表彰他们对希格斯玻色子所做的预测^[1-4]。

希格斯粒子最主要衰变过程的发现

从2012年至2018年,希格斯玻色子的研究热潮并未退却,实验物理学家陆续发现并证实了希格斯粒子衰变成各种不同粒子(光子对、W玻色子对、Z玻色子和 τ 轻子对等过程)^[18-30],这些已经观察到的衰变虽有重要意义,但其在希格斯玻色子的衰变中只占不到30%;希格斯玻色子衰变成一对底夸克,才是其最频繁发生的主要衰变过程,占比高达58%。由于强子对撞机上胶子背景事例数($g \rightarrow b\bar{b}$)是信号的一千万倍以上,所以该衰

变道一直无法被实验观测确认。

在本文开头提到的ATLAS与CMS实验联合了多个希格斯玻色子产生过程的 $H \rightarrow b\bar{b}$ 分析的结果^[5-17],其中包括胶子融合过程(ggF),矢量玻色子融合过程(VBF),W/Z玻色子对伴随产生过程(W/Z+H),顶夸克对伴随产生过程(ttH)。在此次分析中,ATLAS与CMS实验利用统计方法综合了各个分析的结果,最终两个实验分别以超过5倍标准偏差的信号显著度首次发现 $H \rightarrow b\bar{b}$ 衰变道(图1)^[5, 12]。其中,中国ATLAS组的中国科学院高能物理研究所在ggF与VBF过程的分析中作了关键贡献。中国ATLAS组的山东大学、中国科学技术大学、南京大学、上海交通大学和李政道研究所等单位在W/Z+H过程的分析中作了关键贡献。中国CMS组的中国科学院高能物理研究所在ttH过程的分析中作了关键贡献。中国组所有成员单位都对ATLAS与CMS探测器运行维护以及硬件升级等作出了重要贡献,而探测器(特别是像素探测器)是有效探测底夸克的硬件基础。这项发现填补对希格斯粒子认知的一大空白,并将进一步证实解释夸克质量的希格斯机制。

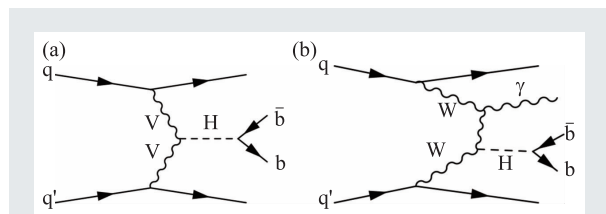


图2 (a)传统的四喷注末态的技术路线,该末态包含4个喷注,其中2个是底夸克喷注;(b)本团队创新性提出的高能光子末态子集的技术路线。该末态包含高能光子与4个喷注,其中2个是底夸克喷注^[6]

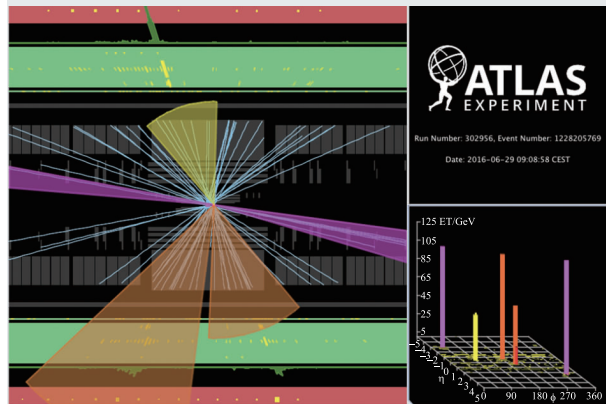


图3 高能所ATLAS团队主导在矢量玻色子融合(VBF)过程与胶子融合过程(ggF)中寻找 $H \rightarrow b\bar{b}$ 衰变的分析。左图是高能光子末态子集的技术路线中发现的其中一个希格斯玻色子的信号事件的事例展示。其中,黄色的圆锥代表高能光子,橙色的圆锥代表希格斯玻色子衰变产生的两个底夸克喷注,紫色的圆锥代表VBF过程中的VBF前向喷注

高能物理研究所ATLAS组的贡献

$H \rightarrow b\bar{b}$ 分析涉及多个产生过程,无法尽述。下面主要介绍中国科学院高能物理研究所ATLAS团队所主导的 $H \rightarrow b\bar{b}$ 分析中的一部分,即VBF与ggF过程的分析^[6]。高能所团体在该过程的分析中提出了一个新的实验技术路线。

VBF过程中 $H \rightarrow b\bar{b}$ 数据分析有两种技术路线,其中一种是传统的四喷注末态的技术路线,如图2(a)所示,该末态只有4个喷注而没有轻子与光子,这种类型的末态在大型强子对撞上背景事例非常多,特别是胶子喷注的背景($g \rightarrow b\bar{b}$),信噪比低,而且在实验上触发系统中记数率过高,用通用的喷注触发很难有效地记录类似信号的事例。

另外一种技术路线是本团队创新性提出的高能光子末态子集(图2(b))。高能光子的引入大大

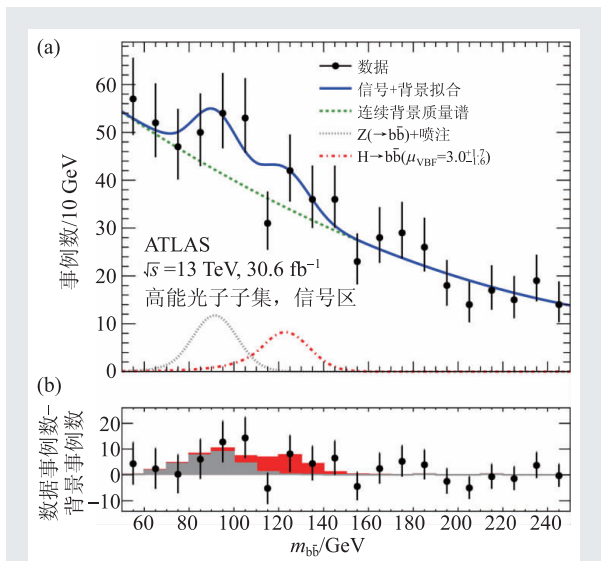


图4 高能所ATLAS团队主导在矢量玻色子融合(VBF)过程与胶子融合过程(ggF)中寻找 $H \rightarrow b\bar{b}$ 衰变的分析 (a)在VBF+ggF过程中实际数据中的事例数随底夸克对不变质量($m_{b\bar{b}}$)的分布。其中, $H \rightarrow b\bar{b}$ 衰变过程在不变质量谱的贡献由红色虚线标出^[6]; (b)实际数据中事例数与背景事例数的差随底夸克对不变质量的分布,其中灰色的直方图为 $Z \rightarrow b\bar{b}$ 过程的贡献,红色直方图是 $H \rightarrow b\bar{b}$ 衰变过程的贡献

减少了胶子背景事例,其原因是胶子是电中性粒子,与光子没有相互作用,所以在 $b\bar{b}\gamma$ 子集中胶子背景的事例相对比较少,信号灵敏度高。而且高能光子的引入能改进VBF过程信号的触发设计,提高信号事例的触发效率。

通过比较两种技术路线预计的信噪比可知,高能所组提出的高能光子末态的技术路线在信噪比与信号显著度上比传统的四喷注末态的技术路线更加优越。图3为用新技术路线寻找到的一个信号事件的事例展示。图4展示了该技术路线在VBF和ggF过程中寻找 $H \rightarrow b\bar{b}$ 衰变的信号灵敏度。VBF与ggF过程在这次发现中贡献约两倍标准差的信号显著度^[6],是此次发现的关键一环。

希格斯玻色子最主要衰变过程的发现进一步确认了希格斯玻色子是组成物质世界的基本粒子

(特别是夸克)的质量来源。高能物理前沿还有很多基本问题与希格斯玻色子的研究关系密切:暗物质的质量是从哪里来?中微子的质量是多少?科学家普遍相信希格斯玻色子也是暗物质与中微子的质量来源。通过进一步研究希格斯玻色子的性质,有望为物理学中其他一些基本问题提供线索。

参考文献

- [1] Englert F, Brout R. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 13:321
- [2] Higgs P W. *Phys. Lett.*, 1964, 12:132
- [3] Higgs P W. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 13:508
- [4] Guralnik G, Hagen C, Kibble T. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 13:585
- [5] ATLAS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2018, 786:59
- [6] ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2018, 98:052003
- [7] ATLAS Collaboration. *JHEP*, 2015, 01:069
- [8] ATLAS Collaboration. *JHEP*, 2017, 12:024
- [9] ATLAS Collaboration. *JHEP*, 2016, 11:112
- [10] ATLAS Collaboration. *Eur. Phys. J. C*, 2015, 75:349
- [11] ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2018, 97:072016
- [12] CMS Collaboration. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 121:121801
- [13] CMS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2015, 92:032008
- [14] CMS Collaboration. *JHEP*, 2013, 05:145
- [15] CMS Collaboration. *JHEP*, 2014, 09:087
- [16] CMS Collaboration. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120:071802
- [17] CMS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2018, 780:501
- [18] ATLAS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2012, 716:1
- [19] CMS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2012, 716:30
- [20] ATLAS and CMS Collaboration. *JHEP*, 2016, 08:045
- [21] ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2014, 90:112015
- [22] CMS Collaboration. *Eur. Phys. J. C*, 2014, 74:3076
- [23] ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2015, 91:012006
- [24] CMS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2014, 89:092007
- [25] ATLAS Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2015, 92:012006
- [26] ATLAS Collaboration. *JHEP*, 2015, 08:137
- [27] CMS Collaboration. *JHEP*, 2014, 01:096
- [28] ATLAS Collaboration. *JHEP*, 2015, 04:117
- [29] CMS Collaboration. *JHEP*, 2014, 05:104
- [30] CMS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2017, 779:283